

Virtuelles Wellenkonzept zur photothermalem Porositätsbestimmung in CFK-Komponenten

Holger PLASSER¹, Günther MAYR¹, Günther HENDORFER¹, Zoltán MAJOR²

¹ FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH, Wels, Österreich

² Johannes Kepler Universität, Linz, Österreich

Kontakt E-Mail: Guenther.Mayr@fh-wels.at

Kurzfassung

Hohe Festigkeit und geringes Gewicht sind die Hauptgründe für den häufigen Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen in der Luftfahrt. Der Herstellungsprozess solcher Materialsysteme ist ein mehrstufiger Prozess und anfällig für die Bildung von luftgefüllten Hohlräumen. Diese Porosität schwächt die Epoxidmatrix und führt zu einer erheblichen Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften. Im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung stellt die Pulsthermographie mit optischer Blitzanregung eine interessante photothermale Methode dar, da sie aufgrund der Infrarotkamera ein berührungsloses, schnelles Prüfverfahren zur Abschätzung von Materialeigenschaften oder zur Fehlererkennung ist. In dieser Arbeit setzen wir das Virtuelle Wellenkonzept ein, welches Ultraschallprüfverfahren für photothermale Messdaten zugänglich macht. Basierend auf dieser Möglichkeit kann die Durchschallungs- bzw. Puls-Echo-Methode angewendet werden, um die Laufzeit der virtuellen Wellen zu bestimmen, die direkt mit der porositätsabhängigen thermischen Diffusionszeit zusammenhängt. Ein vom Signal-Rausch-Verhältnis abhängiger Ansatz wird für die zeitliche Begrenzung der Messdaten verwendet, um die optimale Auswertzeit zu erhalten. Dadurch wird sichergestellt, dass nur Zeitbereiche ausgewertet werden, die Informationen über die Wärmediffusion innerhalb der Probe enthalten. Darüber hinaus werden unerwünschte Effekte von Wärmeverlusten durch Konvektion und Strahlung reduziert. Nachdem das Auswertverfahren an simulierten Daten vorgestellt wurde, wird die experimentelle pixelweise Abschätzung der porositätsabhängigen thermischen Diffusionszeit an einer realen CFK-Komponente demonstriert. Die Ergebnisse werden durch Röntgen-Computertomographie-Referenzmessungen validiert, wobei eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der aktiven Thermographie erzielt werden kann.



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG e.V.

Kassel, 23.05 – 25.05.2022

Virtuelles Wellenkonzept zur photothermischen Porositätsbestimmung in CFK-Komponenten

H. Plasser¹, G. Mayr¹, G. Hendorfer¹ and Z. Major²

¹Josef Ressel Center for Thermal NDE of Composites, FH OÖ Forschungs und Entwicklungs GmbH, Austria

²Institute of Polymer Product Engineering (IPPE), Johannes Kepler Universität Linz, Austria

HAGENBERG | LINZ | STEYR | WELS



Christian Doppler
Forschungsgesellschaft



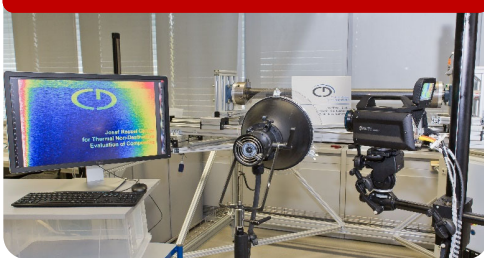
UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES
UPPER AUSTRIA

1

Motivation

Ultraschall-Auswerteverfahren für thermographische Daten

Thermographie



> 10⁶ Detektor Elemente



Ultraschall



~10² Detektor Elemente



PAGE | 2



Christian Doppler
Forschungsgesellschaft



UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES
UPPER AUSTRIA

2

Theoretische Grundlagen

Virtual Wave Concept (VWC)

Schritt 1: Berechnung des virtuellen Wellenfeldes⁽¹⁾

$$\begin{array}{ll} \text{Wärmeleitungsgleichung} & \text{Wellengleichung} \\ \left(\nabla^2 - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial}{\partial t} \right) T(\mathbf{r}, t) = \underbrace{-\frac{1}{\alpha} T_0(\mathbf{r}) \delta(t)}_{\text{Quellterm}} & \left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) p(\mathbf{r}, t) = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} p_0(\mathbf{r}) \delta(t) \end{array}$$

¹Burgholzer P, Thor M, Gruber J, Mayr G. *J Appl Phys* 121, 105102 (2017)

3

Theoretische Grundlagen

Virtual Wave Concept (VWC)

Schritt 1: Berechnung des virtuellen Wellenfeldes⁽¹⁾

$$\begin{array}{l} \text{Verbindung: } \int_{-\infty}^{\infty} K(t, t') T_{\text{virt}}(\mathbf{r}, t') dt' = T(\mathbf{r}, t) \\ \text{mit: } K(t, t') \equiv \frac{c}{\sqrt{\pi \alpha t}} \exp\left(-\frac{c^2 t'^2}{4 \alpha t}\right) \text{ for } t > 0 \end{array}$$

Fredholm
Integral
1st kind

Schritt 2: Ultraschallbasierte Rekonstruktionsverfahren

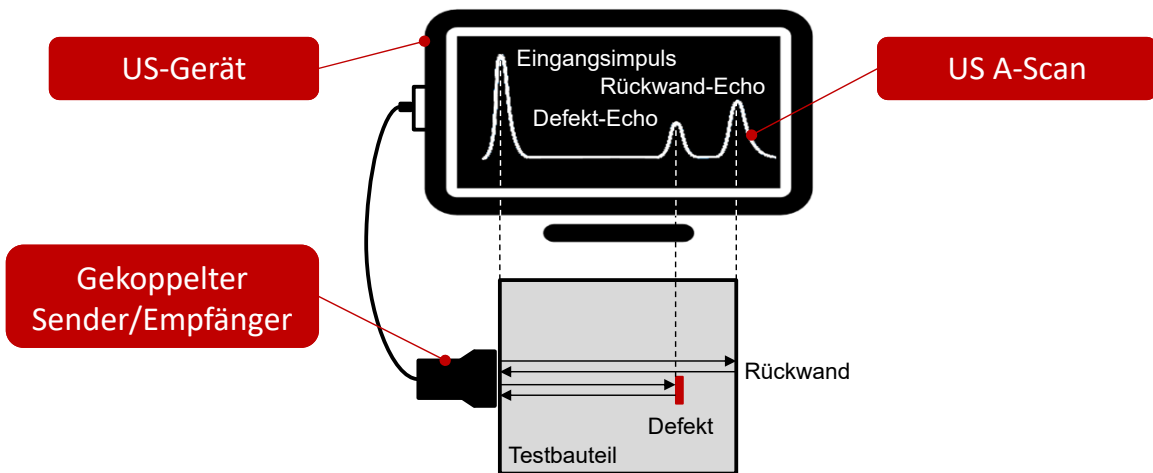
e.g. A-scan Darstellung für Time-Of-Flight Auswertung

¹Burgholzer P, Thor M, Gruber J, Mayr G. *J Appl Phys* 121, 105102 (2017)

4

Ultraschallbasierte Auswerteverfahren

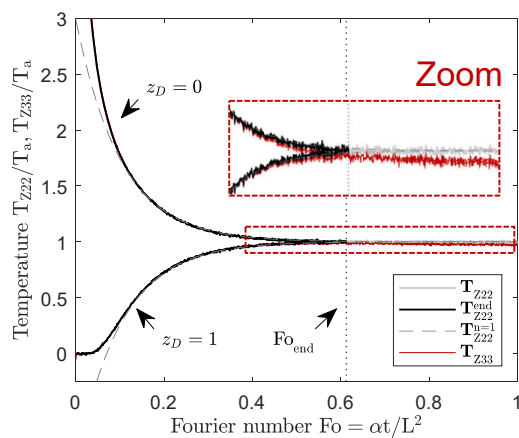
A-Scan mit Time-of-Flight Auswertung



PAGE | 5

5

Optimale Messdauer



$z_D = z/L$... dimensionslose Dicke

Direktes Problem:

$$T_{Z22}(z, t) = \frac{q_0}{\rho c_p L} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(n\pi \frac{z}{L}\right) e^{-\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \alpha t} \right)$$

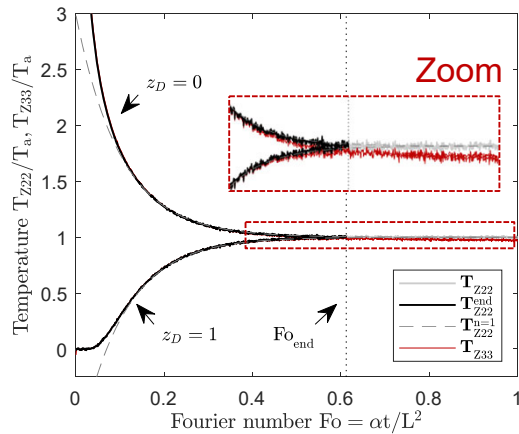
Dimensionslose Näherung $n=1$

$$\Theta = \frac{T_{Z22}^{n=1}}{T_a} = 1 + 2 \cos(\pi z_D) e^{-\pi^2 Fo_{end}}$$

PAGE | 6

6

Optimale Messdauer



$z_D = z/L$... dimensionslose Dicke

Grenzen:

$$\Theta_c = \begin{cases} 1 - \frac{1}{\text{SNR}} & \text{for } z_D = 1 \text{ (transmission),} \\ 1 + \frac{1}{\text{SNR}} & \text{for } z_D = 0 \text{ (reflection).} \end{cases}$$

Optimale Messzeit:

$$\text{Fo}_{\text{end}} = -\frac{1}{\pi^2} \log\left(\frac{1}{2 \text{SNR}}\right)$$

PAGE | 7



7

Inverses Problem

Diskretisieren des Kernel K

Kontinuierlich

Diskret

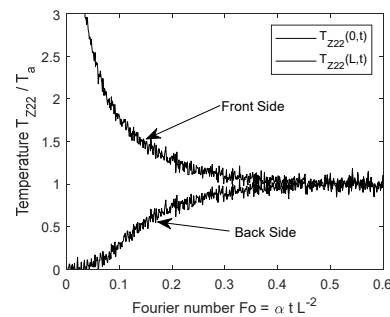
Virtuelles Wellenfeld:

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(t, t') T_{\text{virt}}(\mathbf{r}, t') dt' = T(\mathbf{r}, t)$$

Kernel K (mathematische Model):

$$K(t, t') \equiv \frac{c}{\sqrt{\pi \alpha t}} \exp\left(-\frac{c^2 t'^2}{4 \alpha t}\right) \text{ for } t > 0$$

Measured temperature data:



PAGE | 8



8

Inverses Problem

Diskretisieren des Kernel K

Kontinuierlich

Diskret

Virtuelles Wellenfeld:

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(t, t') T_{\text{virt}}(\mathbf{r}, t') dt' = T(\mathbf{r}, t)$$

Discrete *Fredholm* integral:

$$\sum_{j=1}^N K_{kj} T_{\text{virt},j} = T_k$$

Kernel K (mathematische Model):

$$K(t, t') \equiv \frac{c}{\sqrt{\pi \alpha t}} \exp\left(-\frac{c^2 t'^2}{4 \alpha t}\right) \text{ for } t > 0$$

Kernel (Transferfunktion):

$$K_{ij} = \frac{\tilde{c}}{\sqrt{\pi \Delta_{F0} k}} \exp\left(-\frac{\tilde{c}^2 (j-1)^2}{4 \Delta_{F0} k}\right)$$

Dimensionslose Zahl: $\Delta_{F0} = \alpha (\Delta_t / \Delta_z^2)$
 $\tilde{c} = c (\Delta_z / \Delta_t)^{-1}$

PAGE | 9



9

Inverses Problem

Regularisierung des Kernel K

Diskretes *Fredholm* Integral (Matrixnotation):

Lösung: Virtuelle Welle

$$\mathbf{K} \mathbf{T}_{\text{virt}} = \mathbf{T}$$

\mathbf{T} — Gemessene Temperatur
 \mathbf{T}_{virt} — **Unbekannte virtuelle Temperatur**
 \mathbf{K} — Bekannte Transferfunktion

$$\mathbf{T}_{\text{virt}} = \mathbf{K}^\dagger \mathbf{T}$$

ABER, aufgrund des schlecht-gestellten Problems ist eine Regularisierung notwendig!

T-SVD vs. ADMM

PAGE | 10



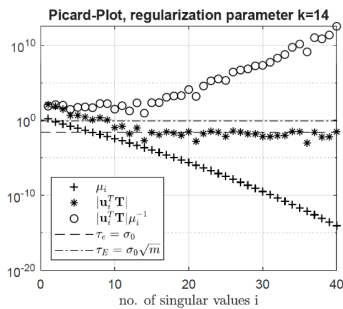
10

Inverses Problem

Regularisierung des Kernel K

State of the art

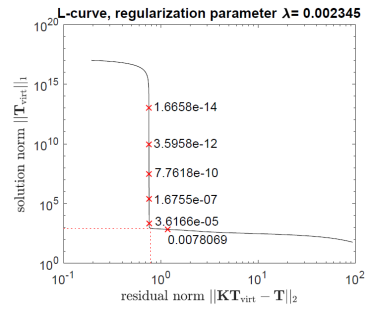
Trunc. Singular Value Decomposition (T-SVD)



vs.

New

Alternating Direction Method of Multipliers (ADMM)



Inverses Problem

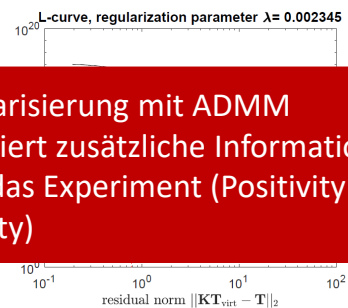
Regularisierung des Kernel K

New

Alternating Direction Method of Multipliers (ADMM)

BENEFIT?

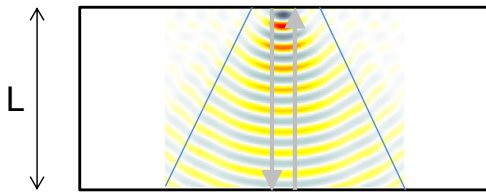
Regularisierung mit ADMM
inkludiert zusätzliche Information
über das Experiment (Positivity and
Sparsity)



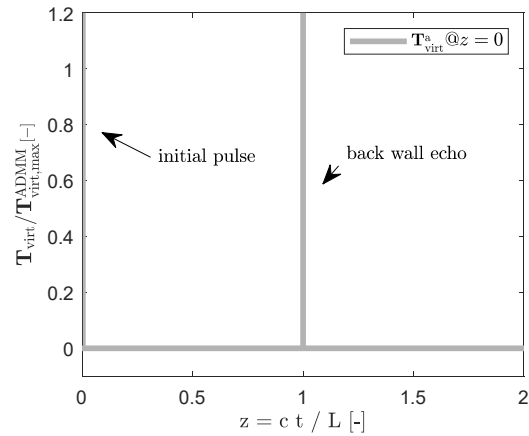
Lösung des inversen Problems

Regularisierte Lösung

Analytic Virtual Wave



„without diffusion“



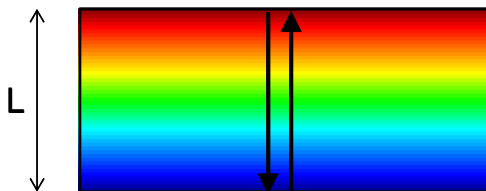
PAGE | 13

13

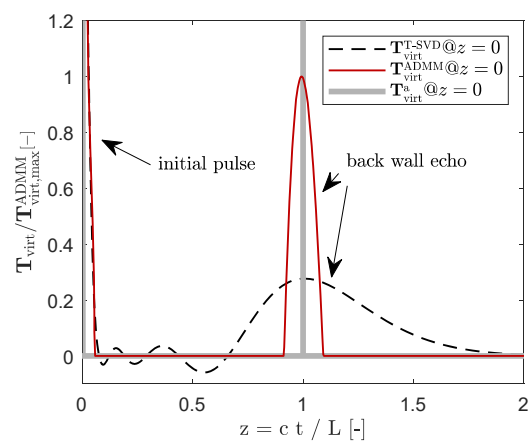
Lösung des inversen Problems

Regularisierte Lösung

Regularized Virtual Wave



„with diffusion“

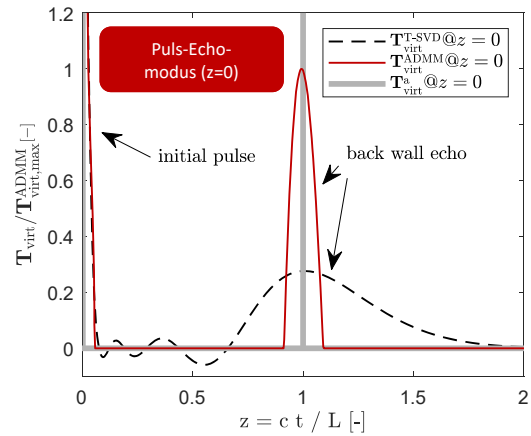
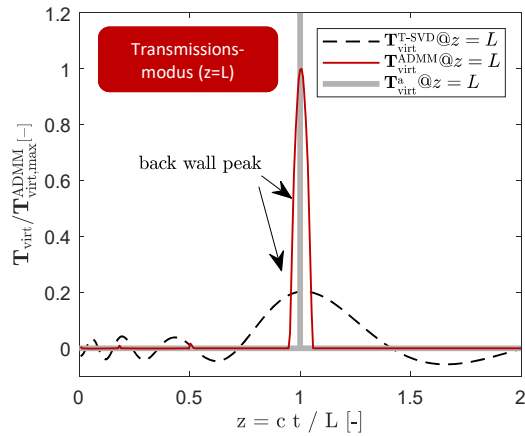


PAGE | 14

14

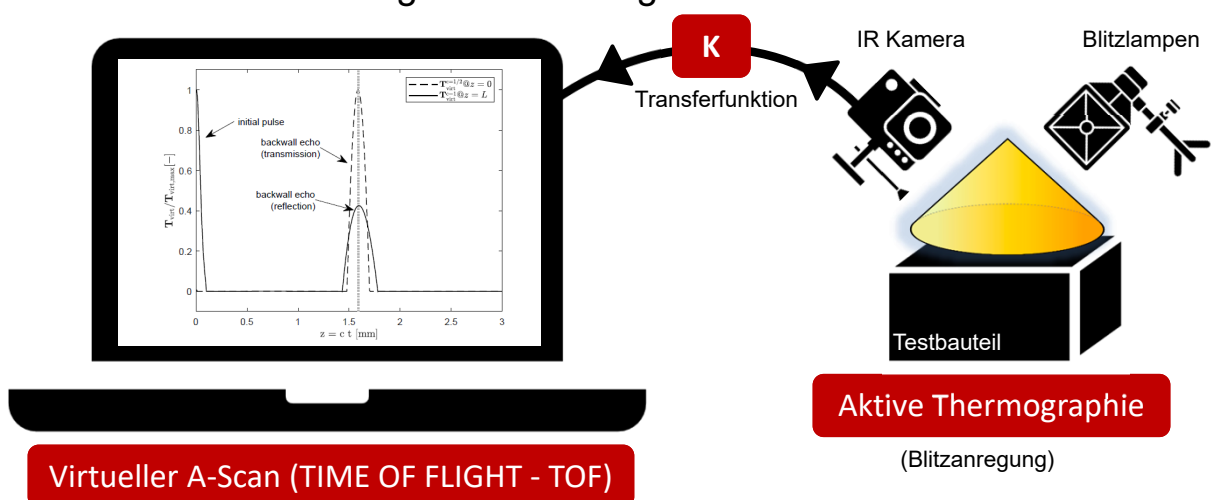
Lösung des inversen Problems

Regularisierte Lösung



Experiment

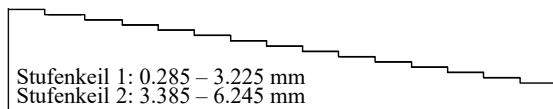
A-Scan mit Time of Flight Auswertung



Experiment

1. CFK Stufenkeil

- ToF basierte Bestimmung der Diffusionszeit t_d
- CFK Stufenkeil als Referenzkörper
- Anregung mit Blitzlampe



2. CFK Porositätsproben

- Porositätsbestimmung anhand der Anwendung von Effektiv-Medium-Theorien
- CFK Prepreg Testkörper mit 10 Lagen
- Anregung mit Blitzlampe



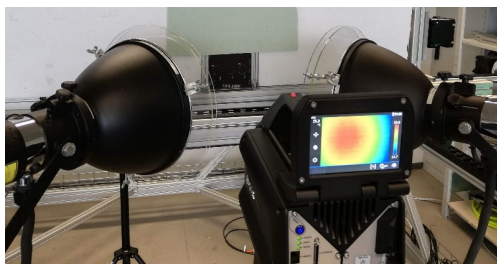
PAGE | 17



17

Experimentelle Ergebnisse I

Bestimmung der Diffusionszeit t_d



Setup

IR - Kamera:

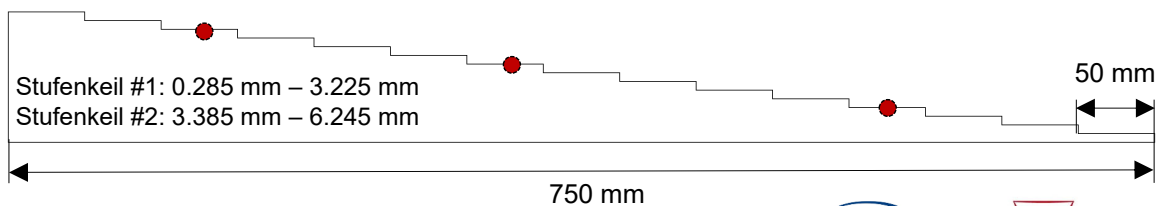
FLIR X8400sc (1280x1024)

Blitzlampen:

Bläsing G6000Z

Konfiguration:

Puls-Echo und Transmission



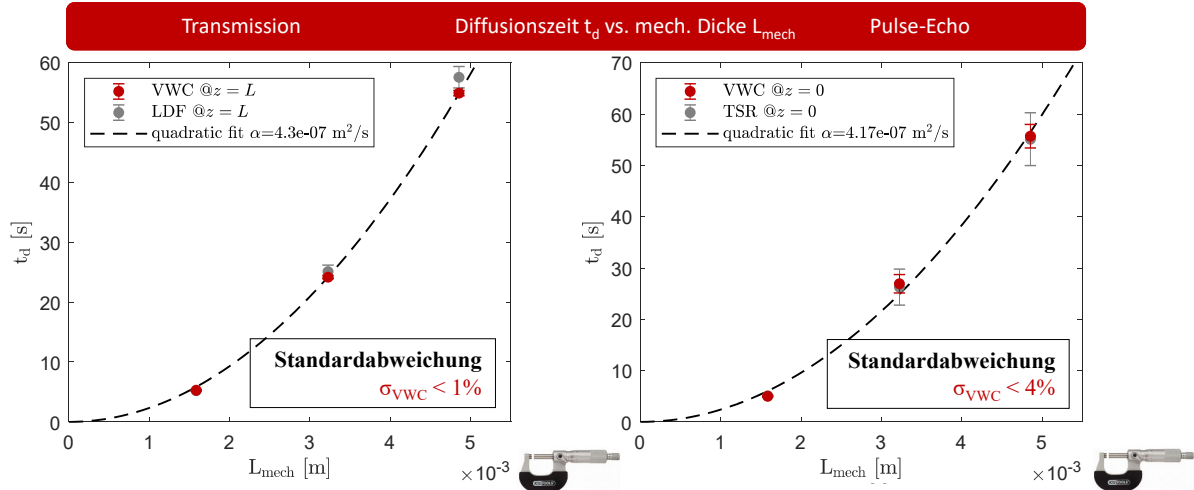
PAGE | 18



18

Experimentelle Ergebnisse I

Bestimmung der Diffusionszeit t_d



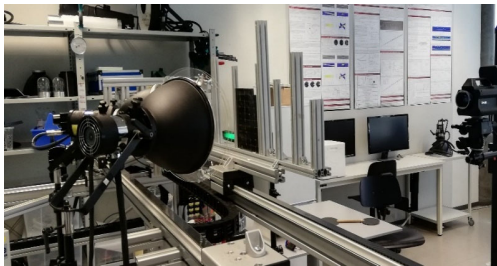
PAGE | 19



19

Experimentelle Ergebnisse II

Porositätsbestimmung 10 Lagen CFK



Experiment

IR - Kamera:

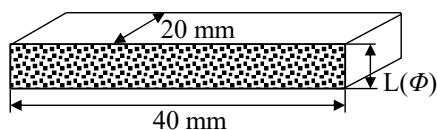
FLIR X8400sc (1280x1024)

Blitzlampen:

Bläsing G6000Z

Konfiguration:

Puls-Echo und Transmission



- > CFRP PREPREG "CYCOM 970/PWC T300 3k"
- > 11 Testkörper (Größe 40 mm x 20 mm)
- > 10-Lagen
- > Porositätsgehalt: $\Phi = 0$ bis 8%

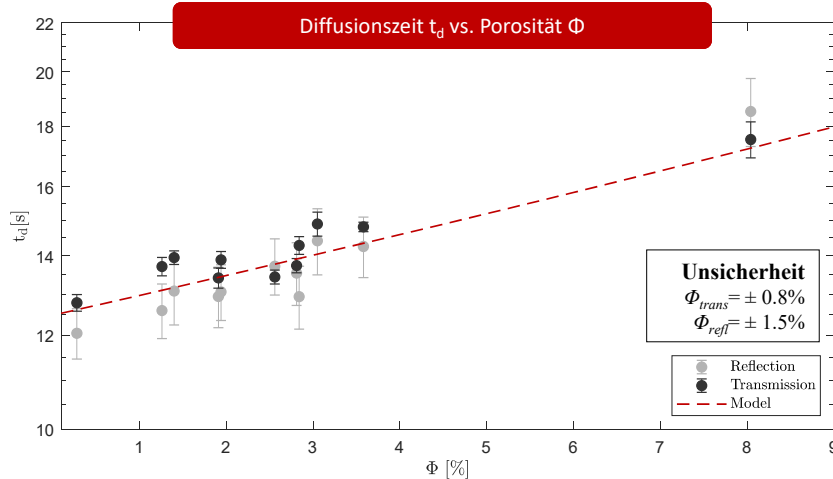
PAGE | 20



20

Experimentelle Ergebnisse II

Porositätsbestimmung 10 Lagen CFK



Zusammenfassung

- Virtuelles Wellenkonzept ermöglicht die Anwendung von Ultraschallauswerteverfahren für aktive Thermographiedaten
- Gleiches Auswerteverfahren für Transmissions- und Reflexionsmessungen
- Optimale Auswertezeit verbessert die Ergebnisse und reduziert den Rechenaufwand
- Vorabinformationen zur Optimierung der Regularisierungsergebnisse
- Durch den Einsatz von ist eine Porositätsbestimmung anhand von Thermographiedaten möglich